



TITLE:

Structural Integrity Assessment of Nuclear Energy Systems(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Ruan, Xiaoyong

CITATION:

Ruan, Xiaoyong. Structural Integrity Assessment of Nuclear Energy Systems. 京都大学, 2020, 博士(エネルギー科学)

ISSUE DATE:

2020-05-25

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k22672>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により要約は2021-06-01に公開; "An Investigation of the Structural Integrity of a Reactor Pressure Vessel using 3D-CFD and FEM Based Probabilistic Pressurized Thermal Shock Analysis for Optimizing Maintenance Strategy" Xiaoyong Ruan, Toshiki Nakasuji, Kazunori Morishita, ("Journal of Pressure Vessel Technology" October 2018, 140(5), 051302 (10 pages)). <https://doi.org/10.1115/1.4040698>

様式 I

博士學位論文調査報告書

論文題目

Structural Integrity Assessment of Nuclear Energy Systems

(原子力エネルギーシステムの構造健全性評価)

申請者

Ruan, Xiaoyong (阮 小勇)

最終学歴

平成 24 年 6 月

(中国) 重慶大学大学院機械工学部機械工学専攻修士課程 (修了)

学識確認

平成 年 月 日 (論文博士のみ)

調査委員

(主査)

京都大学大学院エネルギー科学研究科

准教授 森 下 和 功

調査委員

京都大学大学院エネルギー科学研究科

教授 星 出 敏 彦

調査委員

京都大学大学院エネルギー科学研究科

教授 今 谷 勝 次

(続紙 1)

京都大学	博士（エネルギー科学）	氏名	Ruan, Xiaoyong（阮 小勇）
論文題目	Structural Integrity Assessment of Nuclear Energy Systems （原子力エネルギーシステムの構造健全性評価）		
（論文内容の要旨）			
<p>本論文は、原子力エネルギー変換システムを対象に、構造健全性評価の高度化と保全の最適化に関する研究を論じた結果をまとめたものである。全 5 章から成る。</p> <p>第 1 章は序論で、本研究の背景、位置付け、および目的が述べられている。日本のエネルギー問題と原子力発電の課題、さらには、原子炉圧力容器の高経年化評価の現状とその課題について言及している。高経年化評価の高度化、すなわち、リスクに基づく合理的なシステム保全を実現するという目的を達成するには、高経年化事象とそれに対する原子炉構造物の応答を正しく理解する必要がある。そのために、構造力学解析と数値流体解析を連成した評価を行うこと（マルチフィジックスシミュレーション）、および、脆性破壊現象の照射効果の機構論を明らかにすること（マルチスケールモデリング）が必要であると指摘している。</p> <p>第 2 章では、応力拡大係数 K_I 評価の高度化の検討を行っている。商用原子炉の圧力容器（RPV）の構造健全性評価には、これまで簡略的な空間一次元モデルを用いた解析が行われてきたが、本論文では空間三次元モデルを使っている。数値流体計算 CFD と構造解析 FEM の連成から、①原子炉の緊急冷却時の Cold plume 冷却効果の再現、②Cold plume 冷却効果に起因する冷却特性の空間的・時間的ゆらぎの評価、③応力拡大係数 K_I の RPV 内の部位依存性の評価を行い、最終的に、④K_I の確率密度分布を求めることに成功している。そして、この確率密度分布と破壊靱性値 K_{IC} の確率密度分布から、RPV の条件付き破壊確率を評価している。この成果により、従来の、健全か否かの二択評価に過ぎない、いわゆる“決定論的評価”ではなく、健全性の程度を定量的に論ずることのできる“確率論的評価”を可能にしている。</p> <p>第 3 章では、前章で構築した K_I の評価法を応用し、保全最適化の具体例について論じている。大地震発生などの極端条件では、原子炉の非常用炉心冷却装置(ECCS)の一部が故障する可能性があり、結果として RPV の冷却状態が非対称になる。冷却の非対称性から生じる RPV の温度分布の不均一性は、大きな熱応力を発生させるため、K_I 評価値はより大きなものになると懸念される。本論文では、4 ループ RPV を対象に、冷却状態の異なる 5 つのケースに対して確率論的な構造健全性評価を行っている。それぞれのケースについて、CFD および FEM を用いた評価を行い、K_I の空間分布や RPV の条件付き破壊確率を求めている。この条件付き破壊確率および故障した ECCS 数に対する事象の発生確率より、さらに、RPV の脆性破壊確</p>			

率を求めている。この確率は、脆性破壊リスクを定量化した指標として見なされる。保全実施の必要性やその優先順位の決定は、このリスク値に基づいて行うべきとの提案がなされている。

第4章では、破壊靱性値 K_{IC} の評価の高度化を検討している。固体材料の破壊現象は、原子間結合の切断と、より巨視的なレベルで見られるき裂進展の現象が関与するマルチスケールなプロセスである。照射材料においては、ナノサイズの照射欠陥が形成し、破壊現象はそれによる影響を大きく受けるが、その機構は必ずしも明らかでない。RPV 保全に使われる規制基準（脆性破壊の予測式）においても、経験式にとどまっているのが現状である。現在の連続体破壊力学は、破壊現象の巨視的挙動を検証することはできるが、一方で、き裂の発生を含む微視的挙動に関しては、ナノサイズの照射欠陥との関係も含め、未だ理解できていない部分がある。本論文では、破壊の照射影響を定量的にモデル化することを目標に、その第一歩として、破壊の原子論的評価と連続破壊力学評価の相違点を明らかにしている。 α -Fe を対象に、ナノサイズのき裂がどの程度の外部応力によって進展するかを、分子動力学法（MD）を用いて評価し、き裂進展に関わるエネルギー解放率や臨界応力などを求めている。また、それらのき裂サイズ依存性から、き裂先端部の応力集中の程度がき裂サイズ 5nm の前後で異なることを見出している。5nm 以上のき裂については、従来の連続体の理論が成立するのに対し、5nm 以下では応力集中がなく、むしろ理論強度の議論に近いことを見出している。このことから、照射材料の破壊を議論する場合は、ナノサイズの照射欠陥の存在によるき裂周辺の応力集中の程度を議論すべきとの提案を行っている。

第5章では、本研究で得られた成果を総括している。各章で得られた知見をまとめるとともに、今後の課題について整理している。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、原子力エネルギー変換システムの構造健全性評価の高度化と保全の最適化に関する研究をまとめたものである。得られた主な成果は次のとおりである。

原子炉のシステム保全を高度化するには、

- ・ 構造健全性の基本となる材料強度を正しく把握し、材料劣化に関わる高経年化事象の挙動を的確に予測すること
- ・ 予測の不確実性（正確さと精度）をリスクとして定量し、保全の必要性や優先順位を、その不確実性に基づいて決定すること

が重要である。本論文は、予測性（外挿性）向上のために破壊の機構論を明らかにすること、リスクを定量化し、リスクに基づく保全の最適化を検討すること、を目的とする研究をまとめたものである。第1章では、予測とリスク定量化の重要性が述べられている。

リスクを定量化するには、建築学の耐震性評価などで使われているハザード曲線とフラジリティ曲線に相応する知見が、それぞれ必要になる。この評価を原子炉圧力容器（RPV）健全性に適用するには、圧力容器材料のみを注目するのは不十分であり、同時に冷却水の挙動が必要となる。すなわち、構造—流体の連成解析（マルチフィジックス解析）が必要になる。本論文においては、第2章でこうした評価の必要性が述べられ、加圧熱衝撃（PTS）事象を対象に、連成解析の方法論が確立されている。第3章では、具体的事例を扱い、保全の優先順位決定をリスクに基づいて判断するための方法論が示されている。これは、保全学を「不確実性下の意思決定理論」に結び付ける学術的行為であり、本成果により今後の保全学の展開が期待される。

RPVの照射脆化管理の現状について、照射条件とマイクロ構造変化（ナノサイズ照射欠陥の形成）の相関については、機構論に基づく予測式がすでに構築されているが、一方、マイクロ構造変化と材料特性値（破壊靱性値）の相関については、いまだ不十分である。機構論を明確にすることで、脆化式の予測性（外挿性）の向上が期待される。そのためには、連続体力学の範疇で語られる破壊の機構論に、ナノサイズ照射欠陥の影響を繰りこむことが必要になる。破壊の原子論に関する本論文の議論は、外挿性に優れた予測式の構築につながる第一歩として評価される。

以上より、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和2年2月27日に実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容の要約したものとすることを認める。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日：令和3年6月1日以降